

PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE DE ÁCIDO FOSFÓRICO (PAFC)

RESUMEN

El siguiente artículo muestra los principios básicos de funcionamiento de las celdas de combustible, en especial la de la celda PAFC. También se nombran algunas de las características que se deben tener en cuenta al momento de su construcción y algunas de las empresas que se encargan de distribuir este tipo de celdas y sus componentes a nivel mundial.

PALABRAS CLAVES: *PAFC (celda de combustible de ácido fosfórico).*

ABSTRACT

The following one articulate sample the basic principles of operation of the fuel cells, especially the PAFC cell. Some of the characteristics are also named that one should have in bill to the moment of their construction and some of the companies that take charge of distributing this type of cells and their components at world level.

KEYWORDS: *PAFC (phosphoric acid fuel cell)*

MARCO TULIO CALDERÓN

Ingeniero Electricista
Profesor Titular Universidad
Autónoma de Manizales
Estudiante Maestría en sistemas
Automáticos de Producción
Universidad Tecnológica de Pereira
marcocalderon@terra.com.co

LEONARDO DE J. MESA P.

Ingeniero Mecánico
Estudiante Maestría en sistemas
Automáticos de Producción
Auxiliar de Investigación
Universidad Tecnológica de Pereira
Leomesa2@hotmail.com

1. INTRODUCCIÓN

Al realizar una investigación de tipo exploratorio sobre este tema, se pudo determinar que actualmente, tanto a nivel nacional como internacional, la búsqueda de fuentes renovables de energía, que sean más baratas, eficientes y sobre todo que no incrementen la contaminación ambiental, respecto a las fuentes convencionales de energía, esta en crecimiento, debido a los grandes problemas ambientales originados por algunos de los gases que emanan éstas y la inminente desaparición de las fuentes de energía derivadas del petróleo que va por senda irreversible.

Es así pues, que muchas de las industrias que existen actualmente, incluyendo el sector automotriz, están invirtiendo recursos considerables en encontrar e implementar nuevas tecnologías para sustituir los métodos de producción tradicionales y permanecer competitivos en los mercados futuros. Una de estas nuevas fuentes de energía son las celdas de combustible que aunque han tenido un incipiente avance en todos estos años, hoy en día están obteniendo fuerza y confianza en el mercado. Es aquí, donde se vincula la universidad Autónoma de Manizales y su Línea de Investigación “Centros y Sistemas integrados de Manufactura”, que con la realización de la tesis “Principios de Funcionamiento y Construcción de una Celda de Ácido Fosfórico (PAFC)” y de este artículo, pretende avanzar en la investigación sobre celdas de combustible, para que a mediano y largo plazo se pueda manufacturar un prototipo de celda a escala de laboratorio, que permita generar energía eléctrica de una manera eficiente, barata y limpia.

2. CELDAS DE COMBUSTIBLE

2.1. Principios de Funcionamiento

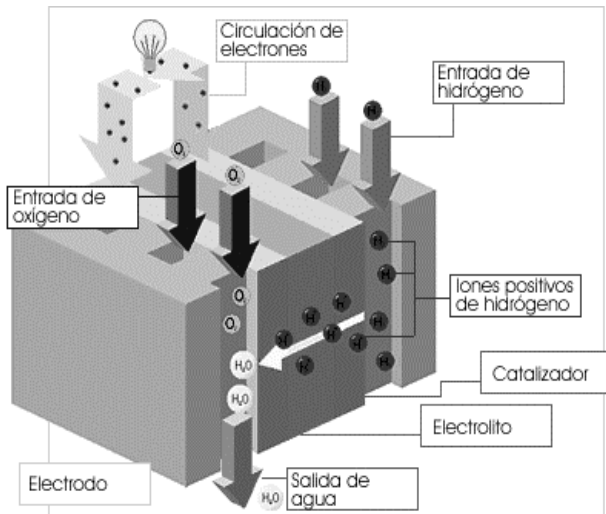
Las Celdas de Combustible son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química de reacción directamente en energía eléctrica. La diferencia principal con las baterías convencionales es que estas son acumuladores de energía en las que la máxima energía depende de la cantidad de reactivos químicos almacenados en ellas, dejando de producir energía cuando se consumen dichos reactivos. Las Pilas de Combustible, por el contrario, son dispositivos que teóricamente tienen la capacidad de producir energía eléctrica de forma indefinida mientras se suministra combustible y oxidante a los electrodos. Sólo la degradación o el mal funcionamiento de los componentes limitan la vida de operación práctica de las Pilas de Combustible.

El principio de funcionamiento en el que se basan las Pilas de Combustible es el inverso al de la reacción electrolítica; oxígeno e hidrógeno se combinan para formar agua con producción de energía eléctrica y calor. Se trata, por lo tanto, de una reacción limpia, en la que el único producto es el vapor de agua que puede ser liberado a la atmósfera sin ningún peligro para el medio ambiente.

Además, del hidrógeno puro que pueda provenir de la electrólisis a partir de una fuente renovable, pueden emplearse como combustibles otras fuentes como gasolina, gases licuados del petróleo, metanol, etanol, etc., que tan solo precisarían de un tratamiento adecuado

(reformado, purificación) para adaptarlos a los diferentes tipos de Pilas de Combustible.

El hidrógeno (H_2) penetra por el electrodo negativo (ánodo) y se disocia, en presencia del catalizador, en iones positivos H^+ y electrones. El oxígeno (O_2) procedente del aire penetra por el electrodo opuesto (cátodo) y se disocia igualmente en presencia del catalizador en iones O_2^- . Los iones positivos del hidrógeno se escapan a través del electrolito en dirección al cátodo, dejando a los electrones libres en el ánodo.



(Fig. 1)

Figura 1. Principios básicos de Funcionamiento.

Si existe un camino eléctrico entre el ánodo y el cátodo los electrones lo recorrerán, produciendo corriente eléctrica. En el cátodo los iones hidrógeno, el oxígeno y los electrones se vuelven a combinar para formar moléculas de agua.

El primer paso lógico para entender la operación de una celda de combustible, es definir su desempeño ideal. La eficiencia pues se define como la relación entre la energía útil y la energía que se podría entregar, así:

$$e_{id} = \frac{\text{energía útil}}{\Delta H} \quad (1)$$

En las celdas de combustible el proceso para la generación de energía es de tipo electroquímico. El máximo trabajo que se puede obtener de una celda de combustible que opera a temperatura y presión constante, viene dado por el cambio de energía libre de Gibbs. A partir del balance de energía sistema -celda de combustible-, se puede llegar a la conclusión de que el máximo trabajo entregado por la celda (W_{elec}) es igual al cambio de energía libre de Gibbs de la reacción; esto es:

$$W_{elec} = \Delta G = -nFE \quad (2)$$

La eficiencia ideal (eficiencia termodinámica) de celda, bajo condiciones reversibles se puede definir entonces como:

$$e_t = \frac{W_{elec}}{-\Delta H} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 1 - \frac{T\Delta S}{\Delta H} \quad (3)$$

El término $T\Delta S$ corresponde al calor intercambiado con el ambiente. Las pérdidas por sobrepotencial de electrodo y la resistencia del electrolito, se pueden estimar convenientemente con la *eficiencia electroquímica* (e_{elc}).

$$e_{elc} = \frac{E_{cel}}{E} = 1 - \frac{h_a + h_c + h_r}{E} \quad (4)$$

Este parámetro además se puede usar para comparar celdas que funcionan con idénticos combustibles (y por tanto, en las que se llevan a cabo las mismas reacciones electroquímicas), pero que difieren en sus partes y diseño.

En este orden de ideas, La eficiencia de la PAFC está definida por la siguiente ecuación:

$$h_H = \frac{0.86 \cdot V \cdot I}{\nabla \cdot Q_H \cdot f_H} \quad (5)$$

Donde:

- ∇ es el flujo de hidrógeno en el ánodo (mol/h)
- Q_H es el valor del calor más alto cedido* (Kcal/mol)
- f_H es el factor de utilización del hidrógeno en el ánodo
- 0.86 es el factor de conversión de W.h a Kcal, Si se utiliza Q_H en KJ/mol no se debe utilizar dicho factor.
- V e I son el voltaje y la intensidad de salida de la celda (V y A respectivamente)

La eficiencia de la PAFC suele estar entre el 40-47 % para HHV.

Esta eficiencia es el resultado del cociente entre la energía eléctrica generada en la celda y la energía consumida por la celda.

El desempeño de la celda, se puede medir con una curva de polarización, que representa el comportamiento del voltaje de la celda contra la densidad de corriente de operación, (Fig. 2).

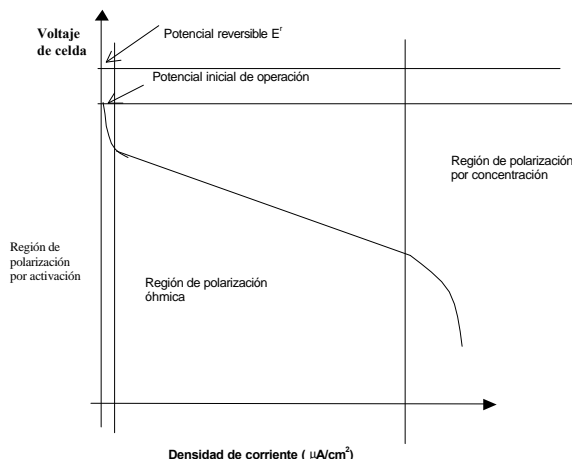


Fig. 2. Curva de polarización de una celda de combustible.

Por este motivo, es muy importante, al momento de manipularlas, tener en cuenta los factores que las afectan, entre ellos, la temperatura, la presión, el factor de utilización, etc. Los efectos por temperatura y presión se pueden determinar por las siguientes ecuaciones:

$VT = 1.0 \cdot (t - 190) \text{ (mV)}$, donde t es la temperatura a la que trabaja la pila. (6).

$VP = 125 \cdot \log P \text{ (mV)}$, donde P es la presión de trabajo. (7).

La tasa de utilización del combustible U , es la fracción del flujo total alimentado que reacciona electroquímicamente. Para celdas que operan a bajas temperaturas, en las cuales el combustible está constituido por un solo componente (por ejemplo H_2), la tasa de utilización se calcula con la sencilla expresión:

$$U = \frac{H_{2en} - H_{2sa}}{H_{2en}} = \frac{H_{2con}}{H_{2en}} \quad (8)$$

No obstante, el combustible puede reaccionar químicamente ó haber escape del mismo por fugas; lo que aumentaría aparentemente la tasa de utilización.

2.2 Principios de Construcción

2.2.1 Estructura de Un Stack de Celdas PAFC.

Los stacks de una pila de combustible de ácido fosfórico, poseen los siguientes componentes básicos:

- Electrodos (ánodo y cátodo).
- Matriz conteniendo el electrolito (ácido fosfórico).
- Separador y platos de enfriamiento.
- Sistema de entrada múltiple (manifolds).

- Otros componentes más pequeños.

La estructura básica de una PAFC consiste en un electrolito (ácido fosfórico) que está contenido en una matriz, la cual se encuentra introducida entre dos electrodos, que son el ánodo y el cátodo, como se muestra en la Figura 3:

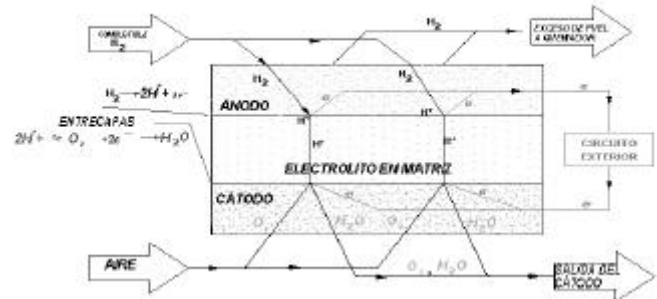


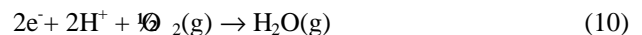
Fig. 3. Estructura Básica de Una PAFC.

Cada electrodo contiene una capa de catalizador en la que se producen las siguientes reacciones:

- ÁNODO



- CÁTODO



Los iones de hidrógeno son transferidos desde el ánodo al cátodo a través del electrolito, y los electrones del ánodo al cátodo vía circuito externo.

La reacción global es la siguiente:



Las reacciones, tanto en el ánodo como en el cátodo, ocurren en la llamada *zona de tres fases*. Recibe este nombre porque en esa zona están presentes las tres fases:

fase sólida (catalizador -Pt-),

fase líquida (ácido fosfórico),

fase gas (hidrógeno y oxígeno).

La estructura de una celda es la siguiente (Fig. 4.):

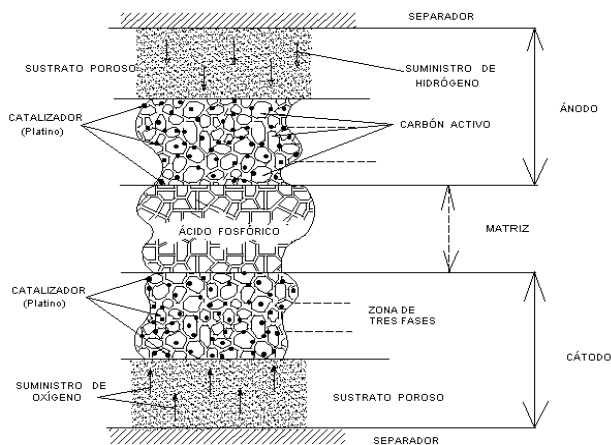


Fig. 4. Estructura de Una Celda.

Para que esta reacción tenga lugar eficientemente, la capa porosa de catalizador debe ser fabricada de manera que tenga suficientes poros para que los gases se difundan libremente y el ácido penetre adecuadamente, ofreciendo un contacto suficiente sobre la superficie de catalizador de Pt. En cuanto a los "manifolds" su primera función es la de alimentar los reactivos gaseosos hasta cada celda. Es importante la alimentación de la corriente de H_2 y de CO_2 debido a su diferencia de densidades.

El electrodo está compuesto de una capa de catalizador donde tiene lugar la reacción electroquímica y un sustrato donde la capa de catalizador esta soportada mecánicamente.

2.2.2 Los componentes de la capa de catalizador son:

Carbón para soporte del catalizador

El catalizador (**Pt**) altamente dispersado

Un agente *hidrofóbico* como el PTFE (teflón).

La superficie de contacto del platino es alta por lo que se utiliza como catalizador. La utilización del Pt es debido a que la reacción ocurre a una temperatura de trabajo baja comparada con las demás pilas de combustible, por lo que dicha reacción debe ser promovida por un catalizador.

2.2.3 Ácido Fosfórico

El ácido utilizado como electrolito es el fosfórico por las siguientes razones:

Buen rendimiento bajo condiciones de alta temperatura,

Tolerancia al CO_2 ,

Baja presión de vapor,

Alta solubilidad para el O_2 ,

Buena conductividad iónica a alta temperatura,

Baja velocidad de corrosión a altas temperaturas, y

Elevado ángulo de contacto.

2.2.4 La Matriz.

El ácido fosfórico está contenido en la matriz propiamente dicha. La función de la matriz es contener el ácido fosfórico por acción capilar. La matriz normalmente usada está compuesta de SiC con una pequeña cantidad espolvoreada de PTFE .

El espesor de la matriz debe ser lo más pequeño, para así, minimizar la resistencia interna.

Los requerimientos básicos de la matriz que contiene el ácido fosfórico son los siguientes:

Elevada acción capilar para retener el ácido.

Prevenir el cruce de los gases dentro de la celda.

Estabilidad química a elevadas temperaturas.

Alta conductividad térmica.

Suficiente resistencia mecánica.

La estructura de la matriz corriente puede cumplir todas estas condiciones exceptuando la de resistencia mecánica. El circuito eléctrico de la celda está completado por un camino externo para los electrones debido a la conductividad de los separadores.

Actualmente existe una gran variedad de empresas europeas y americanas que se encargan de distribuir y proveer a colegios y universidades, de productos relacionados con celdas de combustible; estas empresas venden tanto el stack de celdas, como sus partes separadas y tienen la posibilidad de construir membranas y matrices según la característica de los electrodos y el tipo de combustible a usar.

Estas son algunas de las principales empresas:

ElectroChem, Inc.

Ion Power, Inc

miniHYDROGEN Aps

FuelCellStore.com

2.2.5 Separadores

La característica principal de los separadores es la de impedir la mezcla del gas rico en H_2 del ánodo con el aire del cátodo de la celda contigua, además, de conectar a dos celdas eléctricamente.

Los requerimientos de los sustratos se exponen a continuación:

Suficiente impermeabilidad para prevenir la mezcla de los gases.

Estabilidad química a alta temperatura y presión, además, a la naturaleza del ácido fosfórico.

Alta conductividad eléctrica y térmica.

Elevada resistencia mecánica.

El material utilizado en la fabricación de los separadores es carbón vítreo o un polímero de carbón. El espesor de los separadores no debe ser muy elevado, para que no disminuya su conductividad.

3. MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN PARA LOS ELECTRODOS Y EL SUSTRATO

Por razones económicas los electrodos no se fabrican de metal (catalizador) puro, en vez de esto, se acostumbra elaborar soportes (discos) de carbón, dispersando sobre estos una carga catalítica que es evidentemente menor respecto a un electrodo de catalizador puro, de modo que los catalizadores quedan soportados sobre el carbón.

Estos soportes se fabrican con un tipo de carbón especial (carbón activado), conocido en el mercado como carbón ETJEN, VULCAN XC72R.

Para la construcción de los electrodos ánodo – cátodo se deben de seguir las siguientes etapas:

- Etapa de impregnación.
- Etapa de reducción y filtrado.
- Etapa de secado y prensado.

En las cuales se deben experimentar con los factores de Presión de prensado, temperatura de prensado, tiempo de prensado, % de capa de catalizador y carbón, de forma que se encuentre un equilibrio entre resistencia mecánica y porosidad para el soporte, para que éste posea una textura aceptable (resistente mecánicamente y con superficie homogénea y sin fisuras)

3.1 Acople final de todas las piezas que conforman la celda. En primera instancia, se debe hacer un sandwich entre la matriz y los dos electrodos. El procedimiento para lograr unir estas tres partes es el de *prensado en*

caliente; proceso que se debe de llevar a cabo controlando la presión y la temperatura y cuyo producto final adopta la apariencia de un sandwich. Este sandwich va en medio de los platos distribuidores y se pone lo más centrado posible. En el canal más externo de cada plato se coloca un empaque y la acción combinada de estos dos empaques ajustan el borde más externo del sandwich. De esta forma se previenen el paso de gases del ánodo al cátodo y viceversa, evitando así el corto circuito. Estos platos a su vez se ponen en medio de dos placas de cobre (colectoras de electricidad) y todo el conjunto se ajusta a través de cuatro tornillos, (o más dependiendo del tamaño final), que están aislados eléctricamente. En la fig.5 se observan los elementos utilizados en la celda PEM de ballar.Inc.

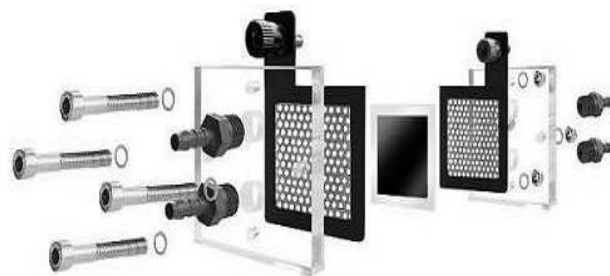


Fig.5. Elementos usados en la PEM

En la figura 6. se observa la celda con los elementos ya ensamblados.

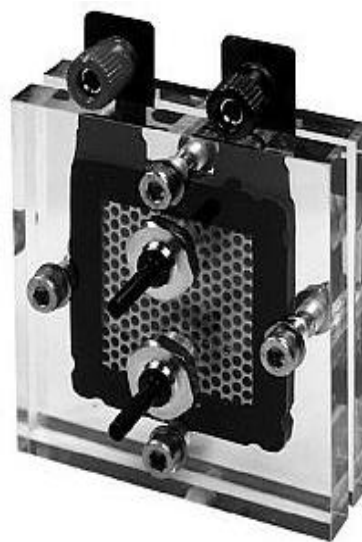


Fig.6. Celda PEM ensamblada

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo de la tecnología de las celdas de combustible ha generado grandes oportunidades de investigación y desarrollo en áreas como la catálisis, nuevos materiales para electrodos y electrolitos, desarrollo de combustibles, procesadores de

combustibles, producción y distribución de hidrógeno, etc.

La extensión en el uso de las celdas de combustible en el futuro parece estar condicionada también por factores sociales y estratégicos, tales como la polución, precio de combustibles y disponibilidad de los mismos. Es importante el desarrollo de la tecnología en cuanto se refiere al sector eléctrico, por eso se debe buscar la disminución en sus materiales de construcción a fin de que el precio por kilovatio sea realmente competitivo frente a otras fuentes de generación.

Entre las ventajas que se pueden encontrar en las celdas es que pueden conectarse en paralelo para suplir cualquier requerimiento energético. Las celdas de combustible adosadas a un procesador permiten obtener energía a partir de combustibles corrientes como alcoholes, gas natural y combustibles de origen fósil, así como también a partir de biomasa o de la fracción orgánica recuperada de residuos sólidos domiciliarios.

En países como Colombia, el argumento mayor a favor de las celdas, es que en un futuro cuando se monten centrales energéticas de celdas de combustible, se utilizarán más eficazmente los combustibles líquidos procedentes del petróleo o carbón, aprovechando mejor el suministro de combustible fósil de la nación.

Las celdas PAFC presentan un gran futuro para la generación de energía eléctrica, en comparación con otro tipo de celdas, ya que es la más avanzada de todas, y su aplicación va desde sistemas pequeños de generación hasta plantas generadoras para hospitales y edificios.

La aplicación de las celdas de combustible en los sistemas de propulsión de los vehículos eléctricos, está plenamente desarrollada por varias multinacionales y la entrada en el mercado de los vehículos con celdas de combustible está garantizada para mediados de la presente década.

La investigación futura de este tipo de celdas le permitirá la Universidad Autónoma de Manizales destacarse a nivel regional como una de las primeras entidades en desarrollar investigación en celdas de Ácido Fosfórico para la generación de energía eléctrica.

5. BIBLIOGRAFÍA

[1] TORRES NOVOA, Jaime Augusto. Celdas de combustible a gas natural, una alternativa de generación limpia y altamente eficiente. Tesis de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

[2] CARRETLE By, FRIEDRICH K.A, et al. “ Fuel Cells Fundamentals and Applications “, *FUEL CELLS 2000*. In line: <http://www.worldwide.fuelcells.org>.

[3] U.S Department of Energy. “ FUEL CELL HANDBOOK “, fourth edition, Morgantown West Virginia 26507-0880, By EG&Services Pearsons Inc, November 1998, pp. 3.1-3.22, By: J.H. Hirschenhofer, D.B. Stauffer, R.R. Engleman, and M.G. Klett En línea <http://www.fuelcells.org/fchandbook.pdf>.

[3] Celdas de Combustible 2000. “Todo lo que quiso saber acerca de celdas de Combustible”. *ucano@iie.org.mx*. En línea: <http://www.iie.org.mx/mproquim/fc2000sp.htm#Tipos%20de%20Celdas%20de>

[4] PAREJA COSSIO, Renson y GUTIERREZ FLOREZ, Omar Darío. Construcción y Caracterización de una Celda de Combustible de Intercambio Protónico a Escala de Laboratorio. Tesis Universidad Nacional de Colombia, facultad de minas. Medellín 20003.

[5] DoD Fuel Cell Demonstration Program <http://www.dodfuelcell.com>

[6] ONSI Corporation Stationary Power <http://www.onsicorp.com>

[7] Fuel cell home page <http://www.fuelcell.org>

[8] Ballard Power System <http://www.Ballard.com>